

Jets impactants à masse volumique variable

J. DUBOIS^{a,b}, M. AMIELH^a, F. ANSELMET^a, O. GENTILHOMME^b

a. Institut de Recherche sur les Phénomènes Hors Equilibre (IRPHE), CNRS-Univ. Aix-Marseille, Technopôle de Château-Gombert, 49 rue F. Joliot Curie, B.P. 146, 13384 Marseille Cedex 13, France

b. Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS), Parc Technologique ALATA - B.P. N°2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

Résumé :

Cette étude expérimentale a pour objet d'identifier et de quantifier les principaux paramètres qui influencent la dispersion d'une fuite gazeuse en présence d'un obstacle dans la région de développement du jet de fuite. Le mélange avec l'air ambiant d'un jet d'hélium impactant est ainsi analysé par la méthode BOS (Background Oriented Schlieren) qui permet de mesurer le champ de masse volumique.

Abstract :

This experimental study is aimed at identifying and quantifying the main parameters acting on a gaseous leakage in presence of obstacles in its development. Some density measurements are performed in the mixing region of an helium jet with the ambient air by the BOS method (Background Oriented Schlieren) when the jet is impacting a sphere placed in the near field.

Mots clefs: Jet impactant, masse volumique variable, BOS (Background Oriented Schlieren), limites d'inflammabilité

1 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le contexte de la quantification des risques associés à une fuite d'hydrogène. Pour prévenir les risques liés à la dispersion d'hydrogène dans l'air, il est nécessaire de bien comprendre et de bien connaître les processus de mélange d'un jet d'hydrogène dans l'air ambiant. Ce travail porte donc sur l'évaluation des volumes inflammables créés par des jets d'hydrogène subsoniques et supersoniques, libres ou impactants. Le volume inflammable est le volume occupé par le mélange air-hydrogène susceptible de s'enflammer en présence d'une source énergétique. Pour l'hydrogène, ce volume inflammable correspond à une fraction volumique dans la gamme 4-75% dans l'air, ce qui correspond à une concentration massique dans la gamme 0.6-29.3%. Le caractère novateur de cette étude réside dans la détermination expérimentale du volume inflammable de jets d'hydrogène en présence d'obstacles. Le cas des jets supersoniques ne sera toutefois pas abordé ici [1]. Pour des raisons de commodités expérimentales, les jets étudiés sont axisymétriques et de diamètres millimétriques. Pour des raisons de sécurité, l'hydrogène est remplacé par de l'hélium, qui est un gaz noble inerte et donc non explosif. L'hélium est proche de l'hydrogène par sa masse volumique $\rho_{\text{He}}/\rho_{\text{H}_2}=2$ et le rapport de masse volumique entre l'air et l'hélium est de $\rho_a/\rho_{\text{He}}=7$. La capacité au mélange de l'hélium dans l'air est donc proche de celle de l'hydrogène dans l'air, car elle est quantifiée par le rapport initial des masses volumiques entre le jet et le milieu ambiant ρ_j/ρ_a et est d'autant plus efficace que ce rapport est faible [2].

On se propose ici de réaliser une cartographie de masse volumique d'un jet d'hélium se développant dans l'air en présence ou non d'obstacle. Une méthode optique, non intrusive, a été privilégiée. Il s'agit de la technique BOS (Background Oriented Schlieren), une technique d'ombroscopie qui s'est développée depuis les années 2000, notamment à partir des travaux de Richard et Raffel [3]. Elle est basée sur la détection des variations locales de l'indice de réfraction liées à l'évolution de la masse volumique, elle-même dépendante de la température, la pression, ou encore des espèces. La relation qui lie l'indice de réfraction d'un milieu transparent à sa masse volumique est donnée par la loi de Gladstone-Dale (eq. (3)). La technique BOS est adaptée à l'étude d'un jet d'hélium se développant dans l'air ; dans ce cas, elle sera principalement sensible

aux gradients de masse volumique induits par la variation d'espèces (ou concentration d'hélium dans l'air).

2 Dispositif expérimental

2.1 Jet et obstacle

La fuite d'un réservoir est simulée par un jet axisymétrique de mur issu d'une buse plate munie d'un orifice de diamètre $D_j = 3\text{mm}$. L'alimentation en hélium est fournie par un stockage à haute pression (200 bars). En aval du stockage, une succession de détentes du gaz permet de régler la pression génératrice de façon à maintenir le débit souhaité. Le jet d'hélium a un nombre de Reynolds Re_j de 3000 ce qui correspond à une vitesse subsonique d'éjection U_j de 118 m/s. L'obstacle est une sphère de diamètre $D_s = 10\text{mm}$ ($= 3.3 D_j$) maintenue en aval, sur l'axe du jet, par une tige de diamètre 4mm. Plusieurs distances x_s de l'obstacle à la section de sortie du jet sont testées, soit $x_s/D_j = 5, 10, 20, 40$. Le développement du jet est étudié jusqu'à $x/D_j < 60$ par des mesures de masse volumique avec la technique BOS, qui a été adaptée aux petites dimensions de l'écoulement étudié. Quelques essais ont également été menés sur un jet de diamètre $D_j = 1\text{mm}$ dans des conditions d'éjection transsonique pour un nombre de Reynolds $Re_j = 7000$.

2.2 Technique BOS

La technique BOS utilise une caméra, un ordinateur, une feuille de papier blanc et une source de lumière, ici une lampe halogène. L'arrière-plan paraît aléatoirement moucheté grâce au rétro-éclairage qui illumine par transparence le grain du papier et l'impression sur la feuille d'une distribution aléatoire de points générée par une pulvérisation de peinture noire. Ces points apparaissent avec une largeur d'environ 3 pixels sur le capteur CCD de la caméra. L'arrière-plan rétro-éclairé et la caméra sont placés de part et d'autre de l'écoulement à étudier, site de gradients de masse volumique (figure 1). Le jet, avec ses gradients de densité, dévie localement les faisceaux lumineux de leur trajectoire initiale, et par conséquent un point de l'arrière-plan apparaît sur le capteur CCD comme déplacé par rapport à la position qu'il aurait sans le jet.

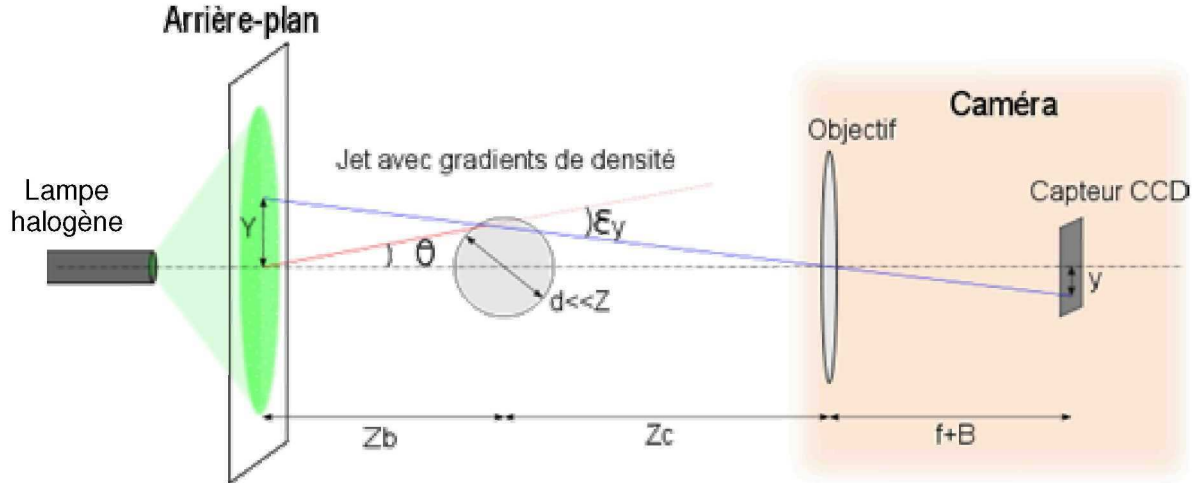


FIG. 1 – Principe de la BOS: mesure des gradients de densité par déviation de la lumière à travers un écoulement d'indice de réfraction variable.

La déviation ε_y observée selon l'axe y résulte du gradient spatial de l'indice de réfraction intégré sur le chemin lumineux, d'où :

$$\varepsilon_y \approx \tan(\varepsilon_y) = \int_{Zb-\frac{d}{2}}^{Zb+\frac{d}{2}} \frac{1}{n(x, y, z)} \frac{\partial n(x, y, z)}{\partial y} dz \quad (1)$$

Pour une géométrie axisymétrique, l'indice de réfraction local $n(r)$ peut être relié à la déviation ε_y en appliquant la transformée d'Abel. On obtient alors [4]:

$$n(r) = n_a \left(1 - \frac{1}{\pi} \int_r^{d/2} \frac{\varepsilon_y}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \right) \quad (2)$$

où n_a est l'indice de réfraction de l'atmosphère ambiante. Dans le cas présent, le milieu ambiant est de l'air à pression et température ambiantes (P_a , T_a).

Pour un mélange gazeux d'indice de réfraction proche de 1, la relation de Gladstone-Dale relie la variation de l'indice de réfraction à la masse volumique du gaz :

$$n - 1 = \rho G(\lambda) \quad (3)$$

où $G(\lambda)$ [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$] est la constante de Gladstone-Dale qui dépend de la longueur d'onde λ de la lumière incidente (pour l'air, on considèrera $G_a = 2.26 \times 10^{-4}$ et pour l'hélium $G_{He} = 1.96 \times 10^{-4}$).

On peut alors en déduire les concentrations massiques C ou volumiques χ moyennes d'hélium dans l'air, par l'intermédiaire de la connaissance de la masse volumique (ρ_j et ρ_a , respectivement pour l'hélium et l'air purs) :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{C}{\rho_a} + \frac{1-C}{\rho_j} \quad (4a)$$

$$\chi = \frac{C \rho_a}{\rho_j + C(\rho_a - \rho_j)} \quad (4b)$$

2.3 Validation de la BOS sur un jet libre subsonique

La technique BOS a été validée sur un jet de tube subsonique d'hélium de diamètre d'éjection $D_j = 8$ mm dans le champ proche ($x/D_j < 12$). La vitesse d'éjection est fixée à 104 m.s^{-1} ce qui correspond à un nombre de Reynolds similaire à celui étudié par Djeridane en 1994 [5], qui a étudié expérimentalement des jets subsoniques à masse volumique variable, notamment un jet libre d'hélium à $Re_j = 7000$ se développant dans l'air.

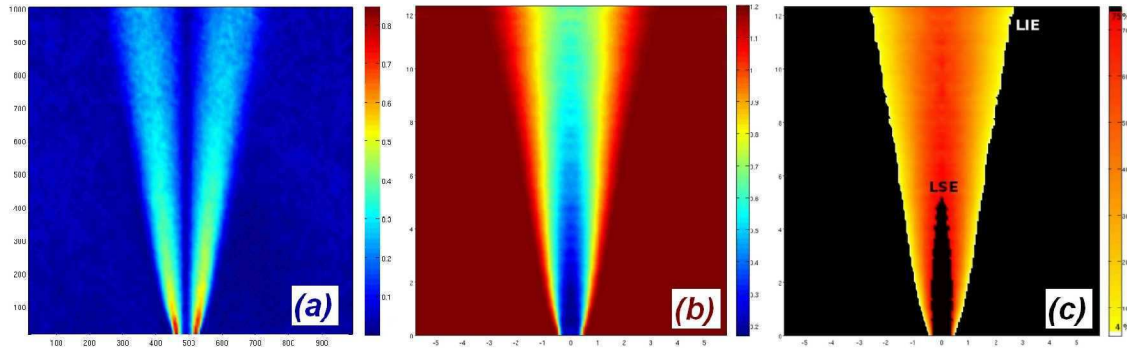


FIG. 2 – Validation de la technique BOS sur un jet libre d'hélium à $Re_j = 7014$, pour $x/D_j < 12$.

(a) Amplitude des déplacements en pixels reliée au gradient moyen de masse volumique local.

(b) Cartographie de la masse volumique obtenue à partir de la transformée d'Abel.

(c) Limites inférieure (LIE = 4%) et supérieure (LSE = 75%) du volume inflammable par analogie avec un jet d'hydrogène.

La figure 2 présente les différentes étapes nécessaires à la détermination du volume inflammable à partir des mesures par la méthode BOS. Elles consistent à exploiter la cartographie des déplacements (FIG.2(a)) pour obtenir le champ de masse volumique (FIG.2(b)) par la transformée d'Abel (eq.(2)), puis à calculer le champ de fraction volumique χ (eq.(4b), FIG.2(c)).

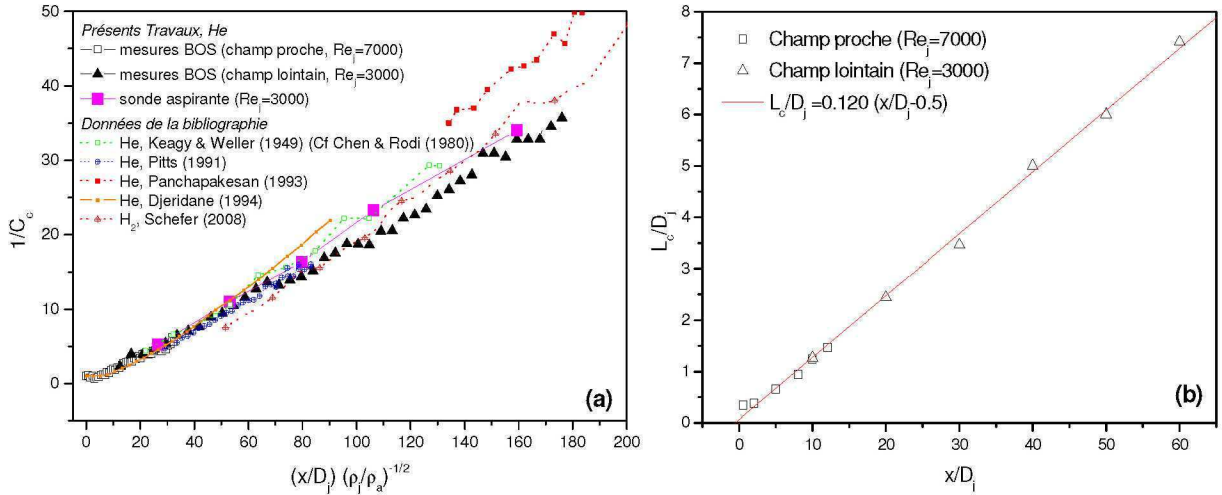


FIG. 3 – Evolution de la concentration massique moyenne dans des jets d'hélium turbulents.

(a) Comparaison de la décroissance axiale avec des données de la bibliographie.

(b) Evolution de la demi-largeur de concentration.

Les mesures de concentration massique C par BOS ont été comparées aux données de la bibliographie. La linéarité de l'évolution de l'inverse de la concentration axiale C_c présentée sur la figure 3(a) atteste de la décroissance axiale hyperbolique de C_c usuellement observée pour un jet turbulent axisymétrique. Par ailleurs, cette décroissance, représentée en fonction de la distance à l'éjection normée par le diamètre équivalent $D_j(\rho_j/\rho_a)^{1/2}$, est tout à fait en accord avec les résultats obtenus dans des jets turbulents d'hélium [2,5,6,7] ou plus récemment d'hydrogène [8] dans la région où les forces d'inertie sont prédominantes par rapport aux forces de flottabilité [7]. L'évolution de la demi-largeur de concentration L_c est linéaire avec un taux de croissance de 0.120 qui est à rapprocher de la valeur de 0.138 obtenue par Panchapakesan et Lumley [6] pour un jet d'hélium pour $x/D_j > 50$. Le jet d'hélium ($Re_j = 3000$) utilisé dans la configuration de jet impactant sur une sphère a également été exploré par la méthode BOS, sans obstacle. La décroissance axiale de concentration massique et la demi-largeur de concentration de ce jet sont portées sur la figure 3 et sont en bon accord avec les résultats obtenus dans les jets turbulents à masse volumique variable.

3 Résultats : jets impactants sur une sphère

La figure 4 présente les cartographies du volume inflammable délimité par les limites inférieure (LIE = 4%) et supérieure (LSE = 75%) du champ de fraction volumique par analogie avec un jet d'hydrogène pour le jet de diamètre $D_j = 3\text{mm}$ décrit en §2.1. De gauche à droite, on distingue le jet libre d'hélium ($Re_j=3000$), puis le jet impactant sur une sphère ($D_s = 10\text{mm}$) située à $x_s = 5, 10, 20$ et $40D_j$. A part en champ très proche ($x_s/D_j = 5$) où le volume du jet est localement accru, l'enveloppe globale externe délimitée par la LIE ne semble pas modifiée dans la zone observée. Toutefois, pour $x_s/D_j = 5$ et 10 , la zone à forte fraction volumique au centre du jet se prolonge plus loin en aval que pour les autres cas où $x_s/D_j > 10$ comme l'indique l'évolution de la région à $\chi = 20\%$ (en vert). Par conséquent, le taux de décroissance de C_c , de part et d'autre le long de l'axe de la tige, est plus faible et on peut supposer que l'extrémité de la LIE se situera plus loin en aval sur l'axe. Le volume inflammable sera donc plus important que pour les autres configurations et même que pour le jet libre. Au-delà de $x_s/D_j = 20$, le volume inflammable ne semble pas modifié par la présence de l'obstacle en comparaison du jet libre. L'analyse de cette configuration montre que le volume inflammable sera principalement modifié lorsque l'obstacle sera disposé dans le champ très proche de l'éjection lorsque le rapport entre la section de sortie du jet et la surface frontale de l'obstacle est de l'ordre de 10 ($\sim D_s^2/D_j^2$).

D'autres essais ont été menés pour un jet de mur d'hélium de diamètre $D_j = 1\text{mm}$, en maintenant un nombre de Reynolds de 7000 (fig. 5). Dans ce cas, le jet est transsonique. A cause des effets de compressibilité, le cône potentiel est plus long [9] ce qui explique pourquoi la zone non inflammable 75-100% en très proche sortie du jet libre (en noir sur la figure 5 (a)) est beaucoup plus importante (jusqu'à $x/D_j = 15$) que dans le cas du jet subsonique (jusqu'à $x/D_j = 5D_j$) à $Re_j = 3000$.

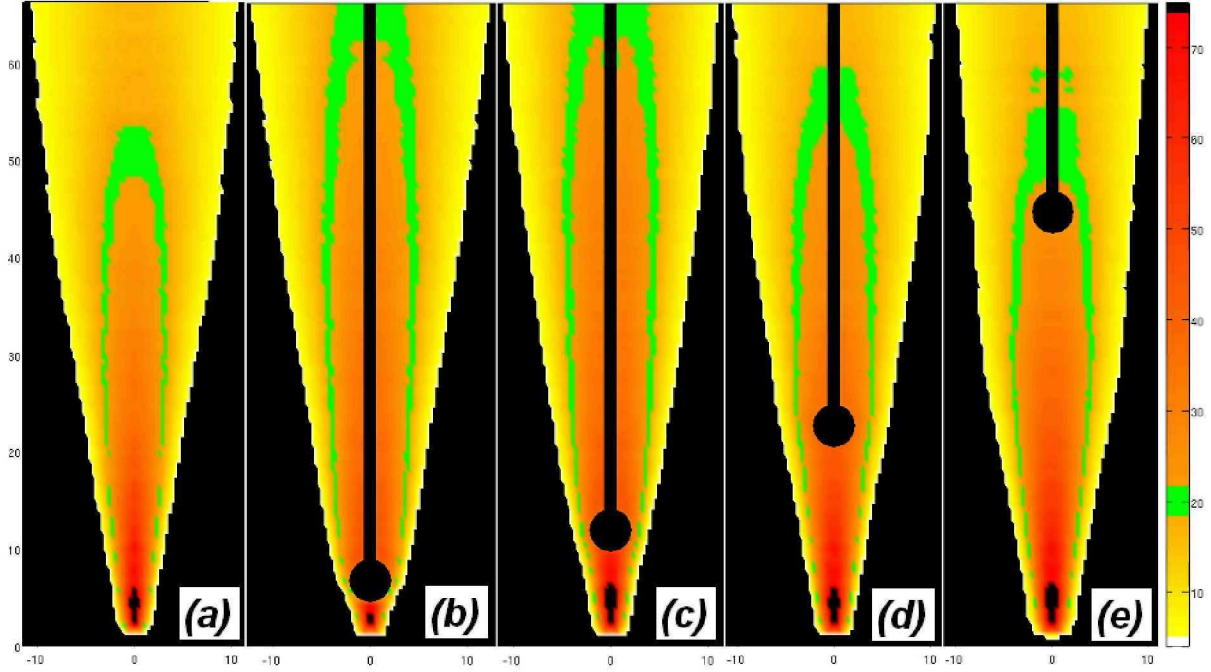


FIG. 4 – Jet libre d’hélium ($D_j=3\text{mm}$) et impactant sur une sphère ($D_s=10\text{mm}$): évolution du volume inflammable ($4<\chi<75\%$) pour diverses positions de la sphère : $x_s/D_j = 5, 10, 20$ et 40 .

Le même obstacle que précédemment est utilisé, mais, dans le cas présent, le rapport entre la section de sortie du jet et la section frontale de la sphère est de 100. Les situations de jet impactant sur la sphère sont présentées pour des distances: $x_s/D_j = 2, 5, 10$ et 20 (Fig. 5 de (b) à (e)). Le développement de l’écoulement est observé jusqu’à $x/D_j = 35$. La figure 5 montre clairement l’élargissement du volume inflammable autour de la sphère. Tant que la sphère est proche de la sortie du jet (jusqu’à $x_s/D_j = 10$), la courbure du volume inflammable autour de la sphère reste forte, imposant ainsi un fort taux d’épanouissement du jet. Dans la zone étudiée ($x/D_j < 35$), une estimation donne un rapport entre le volume inflammable du jet impactant sur la sphère placée à $x_s/D_j = 2$ et celui du jet libre supérieur à 2.5 en éliminant les volumes au-delà de la LSE ($\chi > 75\%$ près de l’éjection, fig. 5 (a)) et les volumes de l’obstacle et sa tige (fig. 5 (b)). Pour le cas où la sphère est placée à $x_s/D_j = 20$, la zone délimitée par la LSE ($\chi > 75\%$ près de l’éjection, fig. 5 (e)) ne semble plus perturbée par la présence de l’obstacle, néanmoins l’enveloppe externe du jet délimitée par la LIE reste très large par rapport au cas du jet libre. Lorsque le rapport D_s^2/D_j^2 est de l’ordre de 100, même pour $x_s/D_j = 20$, l’influence de la sphère sur le volume inflammable reste très importante contrairement au cas précédent où $D_s^2/D_j^2 \sim 10$.

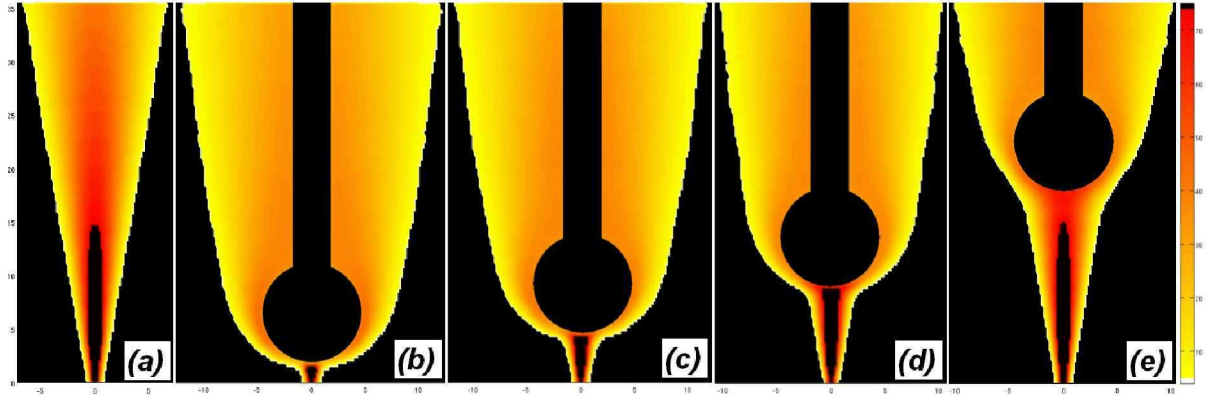


FIG. 5 – Jet libre transsonique d’hélium ($D_j=1\text{mm}$) et impactant sur une sphère ($D_s=10\text{mm}$): évolution du volume inflammable ($4<\chi<75\%$) pour diverses positions de la sphère : $x_s/D_j = 2, 5, 10$ et 20 .

4 Conclusion et perspectives

La méthode BOS (Background Oriented Schlieren) a été mise en œuvre pour analyser l'évolution du volume inflammable pour une fuite millimétrique impactant sur une sphère. La fuite d'hydrogène est simulée par un jet d'hélium dont le mélange avec l'air ambiant est quantifié par des cartographies de fraction volumique moyenne dont on déduit la LIE et la LSE (limites inférieure et supérieure d'inflammabilité). Parmi les paramètres testés dans cette étude (nombre de Reynolds, conditions de sortie subsonique ou transsonique, diamètres du jet et de l'obstacle, distance jet-obstacle), le rapport entre les diamètres de la sphère et du jet D_s^2/D_j^2 est celui qui influe le plus sur le volume inflammable dans la zone observée. Des études supplémentaires sont toutefois nécessaires pour déterminer la limite de la LIE dans sa totalité, car l'étude menée jusqu'ici n'a pas permis de la préciser dans le champ lointain. Dans la limite de l'utilisation de la méthode BOS qui nécessite ici que l'écoulement moyen soit axisymétrique, le jet impactant sur l'embout d'un cylindre sera étudié. Cette configuration permettra de tester l'effet d'une arête vive sur l'évolution du volume inflammable. Notons que cette étude n'est menée que sur le champ moyen de fraction volumique et que le taux de turbulence local doit être également pris en compte pour une meilleure estimation des risques. Dans cet objectif, ces mesures moyennes par BOS seront complétées par des mesures du champ fluctuant de concentration par fluorescence induite par laser (PLIF) d'acétone injectée dans le jet d'hélium.

Cette étude s'inscrit dans le programme hydrogène PAN'H financé par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche). Le présent projet DRIVE a pour objectif d'acquérir des Données expérimentales pour l'évaluation des Risques hydrogène, la Validation d'outils numériques et l'Édition de référentiels

Références

- [1] Dubois J., Amielh M., Anselmet F., Gentilhomme O., Etude de jets sous-détendus axisymétriques d'air et d'hélium par la méthode BOS, 11ème Congrès Francophones de Techniques Laser, Futuroscope, 2008.
- [2] Pitts W. M., Effects of global density and Reynolds number variations on mixing in turbulent, axisymmetric jets, rapport NBSIR 86-3340 National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Washington, 1986.
- [3] Richard H., Raffel M., Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) method, Meas. Sci. Technol. 12 (9), 1576-1585, 2001.
- [4] Haertig J., Sourgen F. et Rey C., Mesures de champ de masse volumique par "Background Schlieren Displacement" (BSD), 9ème Congrès de Vélocimétrie Laser, Bruxelles, 2004.
- [5] Djeridane T., Contribution à l'étude expérimentale de jets axisymétriques à densité, Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée, 1994.
- [6] Panchapakesan N.R., Lumley J.L., Turbulence measurements in axisymmetric jets of air and helium- Part 2. helium jet, J. Fluid Mech., 246, 225-247, 1993.
- [7] Chen C.J., Rodi W., Vertical turbulent buoyant jets- A review of experimental data, The science & appl. of heat and mass transfer, Pergamon Press, 1980.
- [8] Schefer R.W., Houf W.G., Williams T.C., Investigation of small-scale unintended releases of hydrogen: momentum-dominated regime, Int. J. of Hydrogen Energy, 33, 6373-6384, 2008.
- [9] Zaman K. B. M. Q., Asymptotic spreading rate of initially compressible jets—experiment and analysis, Phys. Fluids, 10, 2652-2660, 1998.